

MTA doktori értekezés tézisei

Mikromegmunkálás és ionnyaláb-analízis pásztázó ionszondákkal

Rajta István

Atommagkutató Intézet

MTA Kiváló Kutatóhely

Debrecen

2020

1. A kutatások előzményei

Napjainkban a nanotechnológia a tudományos kutatás és a gyakorlati alkalmazások fontos területévé vált. A legalább egyik dimenziójukban nanométeres nagyságrendbe eső szerkezetek (mikro- és nanostruktúrák) létrehozására és analitikájára az egyik lehetséges módszer a MeV energiájú ionnyalábok használata. Az ionnyaláb-analitikai (IBA) módszerek lehetőséget nyújtanak a mélységi nanométeres felbontású analitikára, vékony rétegek elemzésére. Laterálisan is van lehetőség a nanométeres tartomány vizsgálatára, módosítására: ehhez az ionnyalábot nanométeres nagyságrendűre kell fókuszálni.

Az Atomki 5 MV-os Van de Graaff-gyorsítóján 1993-ban kezdődött el a mikroszonda-projekt egy OTKA műszerközpont-pályázat finanszírozásával. Ebbe a munkába első éves PhD hallgatóként kapcsolódtam be, és egy éven belül már elértük az $1\ \mu\text{m}$ -es nyalábméretet (ebből az eredményből 1996-ban jelent meg az első folyóiratcikk [Ra-96]). Később külföldi posztdoktori tanulmányutak során jelentős szerepem volt az Oxfordi és a Szingapúri Egyetemen a nanoszondák fejlesztésében, és a protonnyalábos mikromegmunkálás (írás) kifejlesztésében (P-beam Writing, PBW).

A PhD-munkámat követően kutatási témáim a pásztázó ion-mikroszonda alkalmazásaihoz kapcsolódtak. A mikroszonda vonzó hatása mellett egy nagy létszámú kutatócsoport is kialakult, szerteágazó kutatási témákat művelve. A hazai és a közel négy év posztdoktori munka során külföldön szerzett tapasztalatok alapján nyilvánvalóvá vált, hogy a mikroszonda létrehozásával megnyíló évtizedes távlatú alkalmazási lehetőségeket magasabb szinten lehet folytatni egy új nanoszonda kifejlesztésével. Ehhez a mikroszondák alkalmazásai során, az azok továbbfejlesztésében megszerzett ismereteken túlmenően egy új, a meglévő Van de Graaff-gyorsítónál jobb energiaszabíthatósággal, kisebb energiaszórással rendelkező, valamint nagyobb fényességű ionnyalábot biztosító részecskegyorsító beszerzésére is szükség volt.

Ezt a koncepciót céloztuk meg az első MTA infrastruktúra-pályázatban 2012-ben az „Asztrofizikától a nanotechnológiáig: az Atomki gyorsítókra épülő kompetenciaközpontja” címmel. Ez a gyorsító többfelhasználós és többcélú, így nemcsak a nanoszonda igényeit kellett figyelembe venni a típus megválasztásánál, hanem a többi kutatócsoport jelenlegi és jövőben várható igényeit, új együttműködések, felhasználók, a karbantartási szükségleteket, a biztosítható nyaláb energiatartományát és az ionválasztékot is. A gyorsítót és többek között a nanoszondát is magába foglaló laboratórium kiépítését az MTA további infrastruktúra-pályázatai és egy GINOP-pályázat tették lehetővé. Az új gyorsító és a nanoszonda révén sikerült bekerülnünk egy H2020 konzorciumba: a RADIATE projekt keretében a feladatunk ionoptikai számítások és ezek mérésekkel történő ellenőrzése.

2. Célkitűzések

Munkám során elsődleges célom volt a nanoszonda hazai megvalósítása, ami nemcsak egy – a meglévő mikroszondához hasonló – új nyalábvég megépítéséből állt, hanem el kellett végezni szinte minden egyes alkotóelemének optimalizálását, újragondolását, továbbfejlesztését. Így például a korábbi mikroszondánál robusztusabb rezgésmentes környezetet kellett létrehozni, jobb vákuumot előállítani. Egy új részecskegyorsító – a Tandetron – beszerzése, telepítése, a hozzá szükséges világszínvonalú környezet biztosítása is elengedhetetlenül szükséges volt.

További célom volt, hogy néhány különleges analitikai feladat megoldásával megmutassam a módszerek hatékonyságát, pl. a könnyű és nehéz elemek szimultán azonosítására alkalmas kétdetektoros PIXE módszer; néhány könnyű elemre még érzékenyebb mikro-DIGE módszer; vagy a nanokapillárisok irányeloszlásának meghatározása.

Céljaim között szerepelt a külföldön megismert PBW módszer meghonosítása, és ennek alkalmazása orvosi, mikrofluidikai, mikrooptikai feladatokra. Az ehhez szükséges infrastruktúra létrehozása, kifejlesztése és optimalizálása.

Természetesen maga a Tandetron gyorsító több más célra is használható: alap- és alkalmazott kutatásokra, sőt akár innovációs és ipari célokra is. Néhány ilyen munka már folyamatban van: a magfizikai és nukleáris asztrofizikai alapkutatásban, az atomfizikában a H2020-EUROPLANET projektben, az alkalmazott kutatásban pedig a H2020-IPERION-HS projektben. A Tandetron Laboratórium infrastruktúrája a nanotechnológia fejlődéséhez is hozzájárulhat a jövőben.

3. Az alkalmazott eljárások

Munkám során különböző ionnyaláb-analitikai módszereket használtam, és a konkrét feladatnak megfelelően továbbfejlesztettem.

A protonokkal indukált röntgenemisszió (Proton Induced X-ray Emission, PIXE) módszert S. A. E. Johansson és munkatársai fejlesztették ki a 70-es években. Az akkori eszközök lehetővé tették az alumíniumnál nehezebb elemekre a multieleemes, roncsolásmentes analitika megvalósítását.

A protonokkal vagy deuteronokkal indukált gamma-emisszió (Proton / Deuteron Induced Gamma-ray Emission, PIGE / DIGE) módszer a PIXE-hez abban a tekintetben hasonló, hogy itt is az ionnyaláb gerjeszti a céltárgy anyagát; de míg PIXE esetében a röntgensugárzást, PIGE/DIGE esetében az anyagban lezajló magreakciók hatására keletkező gamma-sugárzást vizsgáljuk.

Bizonyos analitikai módszerek makro- és mikronyalábokkal is használhatók; a pásztázó transzmissziós ionmikroszkópia (Scanning Transmission Ion Microscopy, STIM) kifejezetten mikronyalábos technika. Ennek egyik gyakori alkalmazási területe a vékony minták sűrűség-

eloszlásának feltérképezése, ezáltal a minta felületén a tájékozódás segítése, az analizálni kívánt területet pontos kijelölése.

A PBW a mikro- vagy nanonyalábokat felhasználó direkt írásos litográfiás módszer. A protonok által roncsolt térfogatban létrehozott látens nyomok kémiai eljárással előhívhatók, így 3-dimenziós mikrostruktúrák hozhatók létre. Ennek meghonosítása az Atomki mikroszondáján az elmúlt mintegy 15 évben új lehetőségeket nyitott meg. A direkt írásos módszerek prototípuskészítésre vagy maszkok készítésére és javításra használhatók, míg a tömegtermelésre alkalmas – így az iparban széles körben elterjedt – levilágítással működő litográfiás módszerek számára pedig jó minőségű maszkokra van szükség.

4. Új tudományos eredmények

Az IBA és PBW terén külföldön és itthon elért eredményeim a tézispontokban találhatóak. A munka kísérleti jellegéből adódóan minden esetben csoportok munkájából születtek az eredmények. A tézispontok alapját képező munkákban meghatározó szerepem volt.

1. tézispont: Mikroszondától a nanoszondáig

A pásztázó ionmikroszonda nyálábméretének csökkentésével megvalósítottam a nanoszondát; az ionválaszték bővítésével pedig megmutattam, hogy nemcsak protonok, hanem nehezebb ionok is fókuszálhatók.

- 1.a *Eljárást dolgoztam ki a pásztázó ionnanoszondák kvadrupól mágneses lencséinek finomhangolására. Ezáltal a Szingapúri Egyetemen a világon elsőként sikerült $35\text{ nm} \times 75\text{ nm}$ nyálábméretet elérni $10\,000\text{ proton/s}$ ionáram mellett. Emellett a már meglévő mikroszonda paramétereinek optimalizálásával $290\text{ nm} \times 450\text{ nm}$ nyálábméretet értem el 50 pA árammal 2 MeV protonokkal, ami szintén világrekordot jelentett [A1].*

- 1.b *A kvadrupól triplett lencsék finomhangolására kidolgozott optimalizáló eljárásom segítségével szén-, oxigén- és szilíciumionokkal is megvalósítottam a mikronyalábot a specifikált $1\mu\text{m}$ -es nyalábmérettel Csehországban, Řež-ben [A2].*
- 1.c *Az Atomki – irányításommal telepített – új 2 MV Medium-Current Plus Tandetron részecskegyorsítójánál meghatároztuk, hogy a kén-hexafluorid szigetelőgáz és argon lefosztógáz nyomásváltozása miként hat a gyorsító energiakalibrációjára [A3]. Megterveztem a gyorsító paramétereit optimálisan kihasználó nano-szondát, amelynek a megépítéséhez OM52 típusú új generációs kvadrupól mágneses lencsét használtam. A berendezés installációjának első ütemében a lencsék finomhangolására kidolgozott optimalizáló eljárásom segítségével 200 nm nyalábméretet értem el [A4].*

2. tézispont: Ionnyaláb-analitika

Az IBA módszerek továbbfejlesztésével és alkalmazásával az alábbi eredményeket értem el.

- 2.a *Új mérési módszert dolgoztam ki, amellyel a vizsgálandó minták teljes analitikai jellemzése megvalósítható egyetlen besugárzással a széntől az uránig terjedő rendszámtartományban [B1]. A mérőkamrában egy hagyományos Be-ablakú és egy ultravékony-ablakú röntgendetektor alkalmazásával szimultán azonosíthatók a könnyű és a nehezebb elemek is az $E \approx 0,2\text{--}6\text{ keV}$ és az $E > 4\text{ keV}$ röntgenenergia-tartományban.*
- 2.b *A mikroszonda vákuumkamrájának megfelelően megtervezett és megépített kiterjesztésével $15\mu\text{m} \times 17\mu\text{m}$ méretű pásztázható deuteronnyalábot hoztam létre $\sim 1\text{ nA}$ árammal. A kapott kísérleti*

adatok összhangban vannak az elméleti számításokkal. A gamma-sugárzás detektálása estén elért, mintegy egy nagyságrenddel nagyobb hatásfoknak köszönhetően jelentősen megnöveltem a módszer érzékenységét [B2].

2.c Megmutattam, hogy a nyaláb méretének mérésére és a rutin-fókuszálás végrehajtására a kidolgozott standard tesztchip kiválóan alkalmas. Mátrixeffektusokkal értelmeztem a szilícium elemtérképeken látható hamis inhomogenitásokat. Az elektronika holtidejének helyfüggésével magyaráztam a homogén nikkelréteg vastagságának látszólagos gradiensét. Megmutattam, hogy az eredeti célon túl a tesztminta oktatási célokra is kitűnően használható [B3].

2.d Alumínium-oxid nanokapillárisok irányeloszlását határoztam meg STIM módszerrel. Igazoltam, hogy egy-egy doménen belül a kapillárisok a $15\mu\text{m}$ -es mélységig végig párhuzamosak, a fel-tételezéseknek megfelelően. A mintát elforgatva megállapítottam, hogy a szomszédos domének kapillárisirányai között $\sim 2^\circ$ eltérés van [B4]. Hasonló módon, polikarbonát membránban nehézion-nyomok kimarásával létrehozott véletlenszerűen elhelyezkedő nanokapillárisok irányeloszlását határoztam meg. Megmutattam, hogy az egyedi kapillárisok irányeloszlása a nanokapillárisok geometriai nyílásszögénél (ami kb. $0,3^\circ$) – a nehézionok besugárzási paramétereivel korrelálva – lényegesen nagyobb szórást mutat (kb. $0,95^\circ$) [B5].

3. tézispont: PBW – metodika és rezisztanyagok fejlesztése

A protonnyalábos írás kifejlesztéséhez a következő eredményekkel járultam hozzá.

3.a Módszert dolgoztam ki kis töltésmennyiség mérésére. Megmutattam, hogy a szekunderelektron-hozam – adott anyag és sima felület

esetén – arányos a protonnyaláb által bevitt töltéssel, így használható a töltés monitorozására. Az SU-8 epoxy alapú rezisztanyagot vizsgálva igazoltam, hogy az egységnyi töltés által kiváltott jelek közül a szekunderelektron-hozam a legnagyobb intenzitású – az addigi gyakorlatban bevált RBS-normalizáláshoz képest minimum 30-szoros volt az így elért hozam [C1].

3.b Elsőként készítettem nagyfelbontású fém mikrobélyegzőket PBW módszerrel létrehozott polimer mikrostruktúrákból nikkel- és rézgalvanizálással. Demonstráltam a sorozatgyártás lehetőségét későbbi innovatív alkalmazásokhoz [C2].

3.c Új típusú, javított felületi minőségű tesztmintát – kalibrált rácsállandójú öntartó rézrácsot – készítettem a protonnyaláb méretének meghatározására. Ezzel a mikro- és nanonyalábok mérete is a korábbiaknál lényegesen jobb (~ 100 nm nagyságrendű) pontossággal meghatározható [C3].

3.d Az általánosan elterjedt poli(metil-metakrilát) (PMMA) polimer, valamint a fényérzékeny Foturan üveg mellett a hazai gyakorlatban radondetektálásra használt CR-39 néven ismert poliallil-diglikol-karbonát (PADC) anyagot használtam elsőként a hazai PBW során. Megvizsgáltam a protonok által a Foturan és CR-39 anyagba bevitt roncsolás mértékét és a roncsolt tartomány marási tulajdonságait [C4]. Meghatároztam a CR-39 protonokra vonatkozó dózisérzékenységet: a mikromegmunkáláshoz szükséges optimális protonfluens $3,75 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ (600 nC/mm^{-2}); ami $9,36 \times 10^6 \text{ J/kg}$ elnyelt dózisnak felel meg a felületen. Hasonló elnyelt dózis érhető el tizedennyi 2 MeV energiájú alfa-részecskével [C5]. Majd megmutattam, hogy az érzékenység 30%-kal növelhető a besugárzás utáni CO_2 kezeléssel [C6].

4. tézispont: PBW – mikrooptikai és mikrofluidikai alkalmazások

A kiforrott PBW litográfiás módszert a következő mikrooptikai és mikrofluidikai témákra alkalmaztam.

4.a *Passzív optikai hullámvezetőt készítettem PBW módszerrel PMMA-ban a felület alatt a protonok behatolási mélysége által meghatározott mélységben [D1]. PMMA és poli(dimetil-sziloxán) (PDMS) anyagok esetében is elsőként határoztam meg a protonbesugárzás hatására bekövetkező törésmutató-változás nagyságát a mélység függvényében ($>0,01$; ez elegendő a hullámvezetés létrejöttéhez) [D2, D3]. Megmutattam, hogy besugárzás hatására keletkező tömörödés PDMS-ben sokkal jelentősebb ($\sim 2\mu\text{m}$), mint PMMA-ban ($\sim 200\text{nm}$) [D4], ezért ezen az elven a felületen működő optikai eszközöket (diffrakciós rácsokat, konvex mikrolencsét) hoztam létre protonokkal [D5], és nehezebb ionokkal [D6].*

4.b *Megterveztünk és elkészítettünk egy mikroturbinát, ami a világon az első mozgó alkatrészt tartalmazó – PBW és porózus szilícium marással kombinált módon készült – szilícium eszköz volt¹ [D7]. Egy olyan új mikrofluidikai eszközt terveztünk és valósítottunk meg, amely döntött oszlopok segítségével a cirkuláló ráksejtek kiszűrésére alkalmas. A hagyományos litográfiai eljárásokkal megvalósíthatatlan döntött oszlopok megnövelték a funkcionális felületet, így a kialakuló különleges áramlástani viselkedés elősegíti a funkcionális felület és a folyadék kölcsönhatását [D8].*

¹ A szingapúri csoport elismeri ennek a munkának a jelentőségét azzal, hogy szerepelteti az ipari potenciális felhasználók figyelmébe ajánlott pbeam.com weblapon.

5. Az eredmények hasznosítása

Az infrastruktúra és módszerek fejlesztése elengedhetetlen új tudományos eredmények létrehozásához.²

Az Atomki pásztázó ionmikroszondája az elmúlt évtizedekben számos tudományterületen került hasznosításra. Ezekben az esetekben mindig a kétdetektoros PIXE módszert használtuk.

Ezek közül néhány fontosabb példát említve, az EU FP5 Nanoderm projekt keretében titánnanoszemcsék felszívódását vizsgáltuk emberi és állati bőrök felületén. A vizsgálat eredménye megnyugtató volt: a nanorészecskék nem jutnak el olyan mély rétegekbe, ahol már toxikus hatásuk lenne a szervezetben [Ki-08].

Az EU FP7 Charisma projekt, majd ennek folytatásaként a H2020 IPERION-CH projekt keretében a kulturális örökség megőrzése témában hozzáférést (Transnational Access) biztosítunk különböző európai országokból érkező régészek számára archeometriai vizsgálataikhoz. Itt nagyon fontos szerepet játszik az alkalmazott ionnyaláb-analitikai módszerek roncsolásmentessége. Ennek érdekében a mikronyalábot nemcsak vákuumban, hanem levegőre kihozva is alkalmazzuk. Ezekből az eredményekből is számos publikáció született, pl. [Ko-12], [Szi-16].

Csoportunkban több évtizedre nyúlik vissza légköri aeroszolok vizsgálata, kezdetben makro-PIXE, később mikro-PIXE módszerrel is

² Ilyen fejlesztések nélkül nem lett volna lehetséges a későbbi generációk számára részecskegyorsítókra alapozott kísérleti munka. A külföldi gyorsítók melletti mérésekre is azért tudnak csatlakozni – sőt gyakran ott irányító szerepet is vállalni – a hazai kollégák, mert itthon van lehetőségük arra, hogy megszerezzék az ehhez szükséges tapasztalatot. Az Atomki alapításától kezdve Szalay Sándor professzor is fontosnak látta ezt, ezért kezdtek bele először a neutrongenerátorok fejlesztésébe, később a kaskádgyorsító, majd a 60-as évek végén Koltay Ede vezetésével a Van de Graaff-generátorok építésébe. Ez utóbbiak még ma is jelentős kihasználtsággal működnek. Ugyanilyen hosszútávú felhasználást várhatunk az új Tandetron gyorsító esetén is.

(egyedi szemcse analízis), majd időfeloldással végzett mintavétel, és munkahelyi beltéri aeroszolok vizsgálata is történt [Szo-12]. Ebben a témában jelenleg is több doktorandusz dolgozik.

A Tandetron gyorsító használatával készült első tudományos eredményt – a nukleáris asztrofizikai szempontból fontos $^{17}\text{O}(\text{p},\gamma)^{18}\text{F}$ magreakció hatáskeresztmetszetének méréséről – a Phys. Rev. C folyóiratban közöltük [Gy-17].

6. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

Az 1. tézispont témakörében

- [A1] F. Watt, J.A. van Kan, **I. Rajta**, A.A. Bettiol, T.F. Choo, M.B.H. Breese, T. Osipowicz: *The National University of Singapore high energy ion nano-probe facility: Performance tests*, Nucl. Instr. Meth. B 210 (2003) 14-20.
- [A2] O. Romanenko, V. Havranek, A. Mackova, M. Davidkova, M. Cutroneo, A.G. Ponomarev, G.U.L. Nagy, J. Stammers, and **I. Rajta**: *Performance and application of heavy ion nuclear microbeam facility at the Nuclear Physics Institute in Řež, Czech Republic*, Rev. Sci. Instrum. 90 (2019) 013701 (12).
- [A3] **I. Rajta**, I. Vajda, Gy. Gyürky, L. Csedreki, Á.Z. Kiss, S. Biri, H.A.P. van Oosterhout, N.C. Podaru, D.J.W. Mous: *Accelerator characterization of the new ion beam facility at MTA Atomki in Debrecen, Hungary*, Nucl. Instr. Meth. A 880 (2018) 125-130.
- [A4] **I. Rajta**, G.U.L. Nagy, I. Vajda, S.Z. Szilasi, G.W. Grime, F. Watt: *First resolution test results of the Atomki nuclear nano-probe*, Nucl. Instr. Meth. B 449 (2019) 94-98.

A 2. tézispont témakörében

- [B1] I. Uzonyi, **I. Rajta**, L. Bartha,   .Z. Kiss, A. Nagy: *Realization of the simultaneous micro-PIXE analysis of heavy and light elements at a nuclear microprobe*, Nucl. Instr. Meth. B 181 (2001) 193-198.
- [B2] G.  . Sziki, I. Uzonyi, E. Dobos, **I. Rajta**, K.T. Bir  , S. Nagy,   .Z. Kiss: *A new micro-DIGE set-up for the analysis of light elements*, Nucl. Instr. Meth. B 219-220 (2004) 508-513.
- [B3] U. W  tjen, I. B  rsony, G.W. Grime, **I. Rajta**: *On the interpretation of micro-PIXE measurements on a prototype microstructured reference material*, Nucl. Instr. Meth. B 150 (1999) 532-537.
- [B4] **I. Rajta**, G.A.B. G  l, S.Z. Szilasi, Z. Juhász, S. Biri, M. M  t  fi-Tempfli, S. M  t  fi-Tempfli: *Nanochannel alignment analysis by scanning transmission ion microscopy*, Nanotechnology 21 (2010) 295704 (4).
- [B5] G.A.B. G  l, **I. Rajta**, S.Z. Szilasi, Z. Juhász, S. Biri, Cs. Cserh  ti, A. Csik, B. Sulik: *Scanning transmission ion microscopy of polycarbonate nanocapillaries*, Nucl. Instr. Meth. B 269 (2011) 2322-2325.

A 3. tézispont témakörében

- [C1] A.A. Bettiol, **I. Rajta**, E.J. Teo, J.A. van Kan, F. Watt: *Proton beam micromachining: electron emission from SU-8 resist during ion beam irradiation*, Nucl. Instr. Meth. B 190 (2002) 154-159.
- [C2] J.A. van Kan, **I. Rajta**, K. Ansari, A.A. Bettiol, F. Watt: *Nickel and copper electroplating of proton beam micromachined SU-8 resist*, Microsystem Technologies 8 (2002) 383-386.
- [C3] F. Watt, **I. Rajta**, J.A. van Kan, A.A. Bettiol, T. Osipowicz: *Proton beam micromachined resolution standards for nuclear microprobes*, Nucl. Instr. Meth. B 190 (2002) 306-311.

- [C4] **I. Rajta**, I. Gómez-Morilla, M.H. Abraham, Á.Z. Kiss: *Proton beam micromachining on PMMA, Foturan and CR-39 materials*, Nucl. Instr. Meth. B 210 (2003) 260-265.
- [C5] **I. Rajta**, E. Baradács, A.A. Bettiol, I. Csige, K. Tőkési, L. Budai, Á.Z. Kiss: *Optimization of particle fluence in micromachining of CR-39*, Nucl. Instr. Meth. B 231 (2005) 384-388.
- [C6] E. Baradács, I. Csige, **I. Rajta**: *CO₂ treatment and vacuum effects in proton beam micromachining of PADC*, Radiation Measurements 43 (2008) 1354-1356.

A 4. tézispont témakörében

- [D1] T.C. Sum, A.A. Bettiol, H.L. Seng, **I. Rajta**, J.A. van Kan, F. Watt: *Proton beam writing of passive waveguides in PMMA*, Nucl. Instr. Meth. B 210 (2003) 266-271.
- [D2] **I. Rajta**, S.Z. Szilasi, J. Budai, Z. Tóth, P. Petrik, E. Baradács: *Refractive index depth profile in PMMA due to proton irradiation*, Nucl. Instr. Meth. B 260 (2007) 400-404.
- [D3] S.Z. Szilasi, J. Budai, Z. Pápa, R. Huszánk, Z. Tóth, **I. Rajta**: *Refractive index depth profile and its relaxation in polydimethylsiloxane (PDMS) due to proton irradiation*, Materials Chemistry and Physics 131 (2011) 370-374.
- [D4] S.Z. Szilasi, J. Kokavecz, R. Huszánk, **I. Rajta**: *Compaction of poly(dimethylsiloxane) (PDMS) due to proton beam irradiation*, Applied Surface Science 257 (2011) 4612-4615.
- [D5] S.Z. Szilasi, N. Hegman, A. Csik, **I. Rajta**: *Creation of convex microlenses in PDMS with focused MeV ion beam*, Micro-electronic Engineering 88 (2011) 2885-2888.

- [D6] G.U.L. Nagy, V. Lavrentiev, I. Bányász, S.Z. Szilasi, V. Havranek, V. Vosecek, R. Huszánk, **I. Rajta**: *Compaction of polydimethylsiloxane due to nitrogen ion irradiation and its application for creating microlens arrays*, Thin Solid Films 636 (2017) 634-638.
- [D7] **I. Rajta**, S.Z. Szilasi, P. Fürjes, Z. Fekete, Cs. Dücső: *Si micro-turbine by proton beam writing and porous silicon micromachining*, Nucl. Instr. Meth. B 267 (2009) 2292-2295.
- [D8] **I. Rajta**, R. Huszánk, A.T.T. Szabó, G.U.L. Nagy, S.Z. Szilasi, P. Fürjes, E. Holczer, Z. Fekete, G. Járvás, M. Szigeti, L. Hajba, J. Bodnár, A. Guttman: *Tilted pillar array fabrication by the combination of proton beam writing and soft lithography for microfluidic cell capture: Part 1 Design and feasibility*, Electrophoresis 37 (2016) 498-503.

7. Irodalmi hivatkozások listája

- [Ra-96] **I. Rajta**, I. Borbély-Kiss, Gy. Móri, L. Bartha, E. Koltay, Á.Z. Kiss: *The new Atomki scanning proton microprobe*, Nucl. Instr. Meth. B 109 (1996) 148-153.
- [Gy-17] Gy. Gyürky, A. Ornelas, Zs. Fülöp, Z. Halász, G.G. Kiss, T. Szücs, R. Huszánk, I. Hornyák, **I. Rajta**, I.K. Vajda: *Cross section measurement of the astrophysically important $^{17}\text{O}(p,\gamma)^{18}\text{F}$ reaction in a wide energy range*, Physical Review C Nuclear Physics 95 (2017) 035805 (10).
- [Ki-08] B. Kiss, T. Bíró, G. Czifra, B.I. Tóth, Zs. Kertész, Z. Szikszai, Á.Z. Kiss, I. Juhász, Ch.C. Zouboulis, J. Hunyadi: *Investigation of micronized titanium dioxide penetration in human skin xenografts and its effect on cellular functions of human skin-derived cells*, Experimental Dermatology B 17 (2008) 659-667.

- [Ko-12] R.I. Kostov, Ch. Protophristov, Ch. Stoyanov, L. Csedreki, A. Simon, Z. Szikszai, I. Uzonyi, B. Gaydarska, J. Chapman: *Micro-PIXE geochemical fingerprinting of nephrite Neolithic artifacts from Southwest Bulgaria*, *Geoarchaeology* 27 (2012) 457-469.
- [Szi-16] Z. Szikszai, A. Angyal, L. Csedreki, E. Furu, R. Huszánk, Zs. Kertész, Z. Szoboszlai, Zs. Török, I. Uzonyi, B. Constantinescu, A. Vasilescu, C. Chiojdeanu, D. Stan: *Trans-National Access in the field of heritage science at the Laboratory of Ion Beam Applications, MTA Atomki*, *Techne* 43 (2016) 59 (3).
- [Szo-12] Z. Szoboszlai, Zs. Kertész, Z. Szikszai, A. Angyal, E. Furu, Zs. Török, L. Daróczi, Á.Z. Kiss: *Identification and chemical characterization of particulate matter from wave soldering processes at a printed circuit board manufacturing company*, *Journal of Hazardous Materials* 203 (2012) 308-316.